

# Su Kalitesi Gözlem Ağlarının Entropi Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Sevinç ÖZKUL

*Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca 35160 İzmir-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 04.04.2000

## Özet

Su kalitesi gözlem ağlarının değerlendirmesinde, mevcut ölçüm programının etkinliğini ve ekonomik verimliliğini ortaya koyabilecek bir yönteme ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, bir gözlem ağının sağladığı bilgiyi sayısal bazda tanımlayabilen entropi yöntemi, su kalitesi gözlem ağlarının tasarımında etkin bir kullanım aracı olma özelliğine sahiptir. Entropi yönteminin gözlem ağı tasarımında kullanılabilirliği konusundaki araştırmalar; istasyon seçimi, gözlem sıklığı, konum/zamana göre tasarım, değişken seçimi ve ölçüm süresi gibi teknik tasarım kriterlerinin belirlenmesinde umut vaat eden sonuçlar vermiştir. Sunulan çalışma, gözlem ağlarının zaman/konum bileşenlerine göre entropi yöntemiyle değerlendirilmesinde yeni bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Sonuçlar Gediz Nehri boyunca gözlenmiş su kalitesi verileri kullanılarak elde edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Su kalitesi gözlemi, Gözlem ağı tasarımı, Entropi, Hidrolojik bilgi, Zamana/konuma göre tasarım.

## Entropy-Based Assessment of Water Quality Monitoring Networks

### Abstract

Assessment of water quality monitoring networks requires potential methods to delineate the efficiency and cost-effectiveness of current monitoring programs. To this end, the concept of entropy has been considered as a promising method in previous studies as it quantitatively measures the information produced by a network. This paper introduces a new approach for the assessment of combined spatial/temporal frequencies of monitoring networks. The results are demonstrated in the case of water quality data observed along the Gediz River Basin.

**Key Words:** Water quality monitoring, Design of monitoring networks, Entropy, Hydrologic information, Temporal/spatial network design.

### Giriş

Mevcut su kalitesi gözlem ağları, etkinliklerini ve ekonomik verimliliklerini azaltan çeşitli aksaklıklar göstermektedir. Bu durum ise, su kalitesine ilişkin bilgi ihtiyacı ile mevcut veri toplama sistemlerinin sağladığı bilgiler arasındaki uçurumun giderek büyümesine yol açmaktadır.

Karşılaşılan bu problem, ağ tasarımında kullanılan yöntemlerin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Sonuç olarak, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin büyük çoğunluğu kendi mevcut gözlem ağlarını değerlendirmeye ve yeniden tasarlamaya başlamışlardır (National Research Council, 1994; Ward, 1996; Ward vd., 1994; WMO, 1994; Adriaanse vd., 1995; Niederlander vd., 1996; Harmancıoğlu ve

Alpaslan, 1997).

Yeniden tasarım işleminin ilk adımı, mevcut gözlem ağının temel özelliklerinin, yani ölçüm konumları, ölçüm sıklığı, izlenecek değişkenler ve ölçüm süresinin değerlendirilmesi olup literatürde bu konuyla ilgili çok sayıda araştırma mevcuttur (Sanders vd., 1983; Tirsh ve Male, 1984; Ward vd., 1994; WMO, 1994; Dixon ve Chiswell, 1996; Harmancıoğlu vd., 1998). Bu çalışmaların çoğunda istatistik yöntemler kullanılmaktadır (Ward ve Loftis, 1986). Bir gözlem ağının tasarım özelliklerinden konum ve ölçüm sıklığının seçiminde, zaman serisi analizleri, karar teorisi ve optimizasyon metodlarının yanı sıra regresyon teorisine dayanan istatistik analizlerden de yararlanılmaktadır. Ayrıca, su kalitesi ölçüm ağlarından elde edilen verilerdeki konumsal bağımlılıkların değerlendirilmesinde kriging ve co-kriging gibi teknikler de kullanılmaktadır (Schilperoot ve Groot, 1983; Jager vd., 1990). Ancak, kriging türü yöntemlerin, istasyonların akarsu boyunca yer aldığı su kalitesi veya akım gözlem ağlarından ziyade, istasyonların alansal dağılım gösterdiği yağış veya yeraltı suyu gözlem ağlarının tasarımına daha uygun olduğu belirtilmektedir (Dixon ve Chiswell, 1996; Smith vd., 1997; Esterby, 1986). Diğer taraftan bazı araştırmacılar, tasarım probleminin daha iyi değerlendirilebilmesi için, yukarıdaki yöntemlerin birlikte kullanılmasını önermektedir (Moss, 1989).

Gözlem ağlarının, istatistiksel veri analiz tekniklerinin uygulanmasına olanak sağlayacak veriyi üreteceği kabul edilmekle birlikte, mevcut tasarım yöntemleri genellikle bu beklentiye cevap vermemektedir. Bu nedenle, gözlem ağlarının sağladığı bilginin değerlendirilmesi de çok güç olmaktadır. Genel olarak, gözlem ağı tasarımında kullanılan yöntemler şu nedenlerle yetersiz kalmaktadır: (a) verinin içerdiği "bilgi"nin kesin bir tanımı yoktur ve nasıl ölçüleceği bilinmemektedir; (b) verinin kullanılabilirliği ya da değeri net olarak tanımlanmamıştır; ve (c) ölçüm konumu ve sıklığına bağlı bilgi transferi yöntemleri kısıtlıdır. Mevcut tasarım yöntemleri, probleme farklı kriterler kullanarak farklı açılardan bakmaktadır ve değerlendirme sürecindeki bu tür kriterlerin verinin değeriyle nasıl ilişkilendirileceği hala cevaplanmamış bir sorudur (Harmancıoğlu vd., 1998).

Giderek artan bir uygulama alanı bulan gözlem ağı değerlendirme yöntemlerinden birisi de, su kalitesinin yanı sıra diğer hidrometrik gözlem ağlarının değerlendirilmesinde de kullanılmakta olan entropi yöntemidir (Husain, 1989; Harmancıoğlu,

1981; Harmancıoğlu ve Alpaslan, 1992; Krstanovic ve Singh, 1993; Moss, 1997; Yang ve Burn, 1994). Entropi, rastgele hidrolojik süreçlerin belirsizliğinin bir ölçüsüdür. Gözlem yapmak suretiyle giderilen belirsizlik, kazanılan bilgi miktarına eşit olduğundan, entropi aynı zamanda, bir veri dizisinin bilgi içeriğinin de sayısal bir ölçütüdür (Harmancıoğlu, 1981). Harmancıoğlu ve Alpaslan (1992) entropi yönteminin, gözlem ağı veriminin sayısal bir ölçütü olarak da kullanılabileceğini göstermiştir.

Gözlem ağlarının, su kalitesinin üç temel istatistiksel karakteristiğini göstermesi beklenir: ortalama, ekstrem değerler ve su kalitesindeki değişimler (ya da trend). Bu bağlamda, entropi yöntemi, gözlem ağlarının değerlendirilmesinde, mevcut verilerin su kalitesinin zaman ve konuma bağlı değişkenliği hakkında getirdikleri bilgiyi ölçmekte kullanılabilir.

Yöntemin temel avantajı, bilgiyi ya da verilerin faydasını kantitatif olarak tanımlaması ve ayrıca, bir gözlem ağının beş temel özelliğini, yani, ölçüm konumunu, sıklığını, birlikte konum/zaman sıklığını, ölçülecek değişkenleri ve ölçüm süresini değerlendirmede kullanılabilmesidir. Yöntem; mevcut gözlem istasyonlarının kapatılması, ve/veya ölçüm sıklığının azaltılması, ve/veya ölçüm programının sona erdirilmesi konularında bir karar verilmesi gereken durumlarda uygulanabilir. Yöntem, ayrıca, zaman ve/veya konum ölçeğinde, gözlem ağı genişletilmesi için ihtiyaçları da ortaya koymaktadır (Harmancıoğlu ve Alpaslan, 1992).

## Uygulanan Yöntem

### Entropinin tanımı

Entropi (bilgi içeriği) ölçütünün tanımı; anlamına, türüne, değerine veya diğer herhangi bir sübjektif özelliğine bakılmaksızın, iletişim yaratan sembol, sinyal ya da sayılar dizisinin istatistiksel yapısını analiz eden Bilgi Kuramı'na dayanmaktadır. Burada "bilgi içeriği" terimi, iletişim yaratabilecek sinyal üretme yeteneği olarak tanımlanmaktadır ve bu çerçevede problem; herhangi bir bilgi kaybına veya tekrarına yol açmadan, yeterli miktarda sinyal göndererek, iletişimin doğru olarak yapılmasıdır. Bilgi Kuramı'nın temel prensipleri, iletişim hatlarından sinyal gönderilmesi işlevini stokastik bir süreç olarak ele alan Shannon tarafından geliştirilmiştir (Shannon ve Weaver, 1949).

Shannon'a göre, bir olay hakkında bilgi

edinilmesi, ancak o olayın belirsizlik içermesi halinde söz konusu olabilir. Buna göre, oluşma olasılığı yüksek olayların meydana gelmesi fazla bilgi getirmemekte; aksine, olasılığı düşük olayların oluşması daha fazla bilgi taşımaktadır. Bu çerçevede, belli bir alternatif çözümün oluşma olasılığı, o çözümü oluşturan işaret, sembol ya da sayının belirsizlik (veya beklenebilirlik) derecesini temsil etmektedir. Bu nedenle, kazanılan bilgi gide-rilen belirsizlik miktarının dolaylı bir ölçütüdür.

Shannon yukarıdaki yaklaşımla entropi kavramını, bir olayın alabileceği çeşitli alternatif durumların (değerlerin) beklenen değeri olarak matematiksel bir bağıntıyla tanımlamıştır. Bu tanıma göre de entropi, belli birimlerle (bit, napier, desibel gibi) ölçülebilen kantitatif bir büyüklük olmaktadır. Böylelikle, bir rastgele sürecin olasılık yapısı belli olduğunda, o sürecin entropisi sayısal olarak hesaplanabilmekte ve söz konusu birimlerle ifade edilebilmektedir. Shannon'un tanımı gereği, entropi fonksiyonu daima pozitif değerler almaktadır. Bu özellikleriyle entropi kavramı, herhangi bir istatistik sürecin bilgi içeriğinin ölçülmesinde kullanılacak nesnel bir kriter olarak kabul görmüş ve hidrolojinin de arasında yer aldığı çeşitli bilim dallarında geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Amarocho ve Espildora, 1973; Harmancıoğlu, 1981; Chapman, 1986; Yang ve Burn, 1994).

Entropi yönteminde dört temel bilgi ölçütü vardır: marjinal, ortak ve koşullu entropiler ve transinformasyon. Shannon ve Weaver (1949), marjinal entropiyi,  $H(X)$ , tanımlayan ilk araştırmacılarıdır.  $X$ , kesikli rastgele bir değişken olmak üzere marjinal entropi:

$$H(X) = -K \sum_{i=1}^N p(x_i) \log p(x_i) \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. (1) no.lu bağıntıda, logaritma işlemi e tabanına göre alındığında ve  $H(X)$  "napier" birimiyle ifade edildiğinde,  $K$  sabitinin değeri 1 olmaktadır.  $K$ , entropinin hesabında kullanılan birime bağlı bir sabittir. Burada  $N; p(x_i)$  ( $i = 1, \dots, N$ ) olasılıklarına sahip basit olayların sayısını göstermektedir.

$f(x)$  olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip bir  $X$  sürekli rastgele değişken için,  $X$ 'in toplam değer aralığı,  $\Delta x$  genişliğinde  $N$  adet parçaya bölünmektedir. Bu durumda,  $i = 1, 2, \dots, N$  olmak üzere,  $X$ 'in  $i$ 'inci aralıkta kalma olasılığı:

$$p_i = p\left(x_i - \frac{\Delta x}{2} \leq X \leq x_i + \frac{\Delta x}{2}\right) = \int_{x_i - (\frac{\Delta x}{2})}^{x_i + (\frac{\Delta x}{2})} f(x) dx \quad (2)$$

şeklinde bulunmaktadır. Bu durumda, (1) no.lu bağıntıdaki  $p(x_i)$  olasılıkları;  $f(x_i)$  frekans analizinden elde edilen nisbi sınıf frekanslarını,  $\Delta x$ 'de, çok küçük seçilen sınıf aralığını ya da kesikleme aralığını göstermek üzere,  $[f(x_i) \Delta x]$  çarpımı şeklinde yaklaşık olarak hesaplanır (Amarocho ve Espildora, 1973). Bu durumda, entropi tanımı sürekli hal için aşağıdaki şekilde genişletilebilir:

$$H(X; \Delta x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \log f(x) dx - \log(\Delta x) \quad (3)$$

Birbirinden istatistiksel olarak tamamen bağımsız  $X$  ve  $Y$  gibi iki rastgele değişkenin içerdiği toplam belirsizlik (entropi) (veya getirecekleri toplam bilgi), her bir değişkenin marjinal entropilerinin toplamına eşittir:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y) \quad (4)$$

$X$  ve  $Y$  değişkenlerinin stokastik olarak bağımlı olmaları halinde, ortak entropileri (4) no.lu bağıntıyla verilen toplam entropiden daha az olacaktır. Sürekli hal için, yine ortak entropi, ya da bağımlı değişkenlerin toplam entropisi:

$$H(X, Y; \Delta x, \Delta y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \log f(x, y) dx dy - \log(\Delta x \Delta y) \quad (5)$$

şeklinde verilmektedir. Burada  $f(x, y)$   $X$  ve  $Y$ 'nin ortak olasılık yoğunluk fonksiyonudur.  $Y$  değişkeninin tümüyle bilinmesi halinde  $X$  değişkeninde kalan belirsizliği temsil eden, verilen bir  $Y$  için  $X$ 'in koşullu entropisi,  $X$  ve  $Y$ 'nin birbirlerine göre koşullu olasılıklarının bir fonksiyonudur:

$$H(X|Y; \Delta x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \log f(x|y) dx dy - \log(\Delta x) \quad (6)$$

Burada,  $f(x|y)$ ,  $X$ 'in  $Y$ 'ye göre koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonudur.

Transinformasyon,  $T(X, Y)$ ,  $X$  ve  $Y$  arasında tekrarlanan bilgiyi ölçen diğer bir entropi ölçütüdür

ve bağımlı  $X$  ve  $Y$  değişkenlerinin ortak entropileri ile toplam entropi arasındaki fark olarak tanımlanabilir:

$$T(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \quad (7)$$

veya:

$$\begin{aligned} T(X, Y) &= H(X) - H(X|Y) \\ &= H(Y) - H(Y|X) = T(Y, X) \end{aligned} \quad (8)$$

Yukarıdaki tanımlamalar, farklı gözlem noktalarını ya da farklı su kalitesi değişkenlerini temsil eden  $M$  adet değişkenle, çok değişkenli hale genişletilebilir (Harmancioğlu ve Alpaslan, 1992). ( $m = 1, \dots, M$ ) olmak üzere  $X_m$  bağımsız değişkenin toplam entropisi:

$$H(X_1, X_2, \dots, X_M) = \sum_{m=1}^M H(X_m) \quad (9)$$

bağıntısıyla bulunabilir. Eğer değişkenler bağımlı ise, ortak entropileri şu şekilde gösterilebilir:

$$\begin{aligned} H(X_1, X_2, \dots, X_M) &= \\ H(X_1) &+ \sum_{m=2}^M H(X_m|X_1, \dots, X_{m-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

Ortak entropiyi hesaplamak için  $M$  değişkenin çok değişkenli ortak olasılık dağılımı kullanılır:

$$\begin{aligned} H(X_1, X_2, \dots, X_M; \Delta x_1, \dots, \Delta x_M) &= \\ - \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, \dots, x_M) \log f(x_1, \dots, x_M) & \quad (11) \\ dx_1 dx_2 \dots dx_M - \log(\Delta x_1 \Delta x_2 \dots \Delta x_M) & \end{aligned}$$

Koşullu entropiler iki ortak entropi arasındaki fark olarak elde edilebildiğinden, (10) no.lu bağıntıdaki koşullu entropilerin tahmini için değişkenlerin ortak entropisini hesaplamak yeterlidir:

$$\begin{aligned} H(X_M|X_1, X_2, \dots, X_{M-1}) &= \\ H(X_1, X_2, X_3, \dots, X_M) - H(X_1, X_2, \dots, X_{M-1}) & \quad (12) \end{aligned}$$

Son olarak,  $f(x_1, x_2, \dots, x_M)$  için çok değişkenli normal dağılım kabul edildiğinde  $\mathbf{X}$ ,  $M$  adet değişkenin vektörü olmak üzere,  $\mathbf{X}$ 'in ortak entropisi şu şekilde gösterilebilir:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{X}) &= (M/2) \ln 2\pi \\ &+ (1/2) \ln |\mathbf{C}| + M/2 - M \ln(\Delta x) \end{aligned} \quad (13)$$

Burada  $|\mathbf{C}|$ ,  $\mathbf{C}$  kovaryans matrisinin determinanı,  $\Delta x$  ise  $M$  adet değişkenin tümü için aynı kabul edilen sınıf aralığı genişliğidir.

### Entropi yöntemi ile istasyon konumlarının değerlendirilmesi

Ölçüm ağının konuma göre sıklığının entropi yöntemi ile incelenmesi, iki veya daha fazla değişkenin (aynı su kalitesi değişkenine ait farklı istasyonlarda gözlenen diziler), aralarındaki stokastik bağımlılık nedeniyle ortak entropilerindeki (belirsizliklerindeki) azalma miktarlarının değerlendirilmesi esasına dayanır. Buradaki azalma miktarları, farklı konumlarda gözlenen aynı su kalitesi değişkenine ait dizilerdeki tekrarlanan bilgiye (transinformasyona) karşılık gelmektedir. Bu nedenle, istasyon konumlarının seçiminde, uygun yerlerde ve uygun sayıda gözlem istasyonunun seçilmesiyle transinformasyonun minimum olması hedeflenmektedir. En düşük transinformasyona sahip istasyon kombinasyonu; bilgi tekrarına yol açmadan, akarsu boyunca kalite değişkeninin değişkenliğini yansıtacaktır. Buna göre, mevcut gözlem istasyonları, giderdikleri belirsizlik veya getirdikleri bilgi miktarlarına göre sıralanabilir.

Aşağıdaki yöntem, istasyonların en iyi kombinasyonunu belirlemek üzere her bir su kalitesi değişkeni için ayrı ayrı uygulanmaktadır (Özkul, 1996; Özkul *vd.*, 2000):

- a) Havzada söz konusu değişkeni izleyen toplam  $M$  adet istasyon bulunduğu düşünülün.  $m(m = 1, \dots, M)$  istasyon numarasını,  $i$  ise  $N(i = 1, \dots, N)$  gözlem süresi içindeki zaman noktasını göstermek üzere, seçilen su kalitesi değişkeninin her bir istasyondaki gözlem dizisi,  $x_{m,i}$ 'ye karşılık gelen  $X_m$  ile temsil edilebilir. Burada, istasyonlardaki toplam gözlem süreleri eşit alınmakla beraber, o süre içindeki toplam veri adedi eksik gözlemler nedeniyle her bir ölçüm konumu için farklı olabilir.
- b)  $M$  adet  $X_m$  ( $m = 1, \dots, M$ ) değişkenin dağılımına uygun çok değişkenli ortak olasılık yoğunluk fonksiyonu (o.y.f.) seçilir. Diğer çarpık dağılımlar için çok değişkenli o.y.f.'larının tanımı güç olduğundan, henüz ilgili ifadeler geliştirilmemiştir. Bu nedenle, çok değişkenli halde entropinin tanımı için, teorik bir kısıtlama olmamasına karşın, halihazırda sadece normal ve lognormal dağılımlar kullanılabilir (Yang ve Burn, 1994). Buna

göre,  $M$  adet  $X_m$  değişkenin ortak o.y.f.'u seçildiğinde, (13) bağıntısı kullanılarak tüm istasyonların ortak entropisi  $H(X_1, \dots, X_M)$ , veya bağımlı değişkenlerin toplam belirsizliği hesaplanabilir.

- c) Bir sonraki adımda, ölçüm ağındaki her bir istasyonda, izlenen değişkene ait  $X_m$  dizileri için  $H(X_m)$  ( $m = 1, \dots, M$ ) marjinal entropileri (13) bağıntısında  $M$  yerine 1 konarak hesaplanır. En büyük marjinal entropiye sahip olan istasyon ( $X_m$ ), değişkenin en fazla değişkenlik gösterdiği veya en belirsiz olduğu konumu ifade ettiğinden ve bu konumda gözlem yapılmak suretiyle en fazla bilgi elde edileceğinden, bu değişkenin ölçüldüğü istasyon,  $X_1$  olarak birinci önceliğe sahip ölçüm konumu olarak seçilir. Artık  $m$  istasyon numarası, öncelik listesindeki sıra numarası  $j$  ile yer değiştirmektedir, yani en büyük entropiye sahip  $m$ .inci istasyon  $X_m, X_j = X_1$  olarak tanımlanmaktadır.
- d) Daha sonra,  $X_1$  istasyonunun, ölçüm ağındaki tüm diğer istasyonlarla ayrı ayrı koşullu entropisi hesaplanarak,  $X_1$ 'in marjinal entropisinde en az azalmaya neden olan, başka bir deyişle en büyük  $H(X_1|X_m)$  koşullu entropiyi, en küçük  $T(X_1, X_m)$  transinformasyonu veren istasyon, sistemdeki 2. önemli istasyon olarak seçilir ve  $X_j = X_2$  olarak işaretlenir. Bir sonraki adımda, ( $X_1, X_2$ ) ikilisi, en düşük transinformasyona sahip üçlü kombinasyonu seçmek üzere, gözlem ağındaki tüm diğer istasyonlarla eşleştirilir.
- e) Bu işlemlere, benzer şekilde, sisteme her adımda birer istasyon ilave ederek devam edilir. Buna göre  $j$ .inci önem sırasındaki istasyon:

$$\min\{H(X_1, \dots, X_{j-1}) - H(X_1, \dots, X_{j-1}|X_j)\} \quad (14)$$

$$= \min\{T(X_1, \dots, X_{j-1}), X_j\}$$

koşulunu sağlayan istasyon olacaktır. Burada  $X_1$  1.ci ve  $X_j$  ise  $j$ .inci öncelikli istasyonu göstermektedir. Koşullu entropiler ve transinformasyonlar:

$$\frac{H(X_1, \dots, X_{j-1}|X_j)}{H(X_1, \dots, X_{j-1}, X_j) - H(X_j)} \quad (15)$$

$$\frac{T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j)}{H(X_1, \dots, X_{j-1}) - H(X_1, \dots, X_{j-1}|X_j)} \quad (16)$$

şeklinde (12) ve (13) bağıntıları yardımıyla hesaplanır. Çok değişkenli normal olasılık yoğunluk fonksiyonu için, transinformasyon:

$$T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j) = -(1/2) \ln(1 - R^2) \quad (17)$$

şeklinde de tanımlanabilmektedir. Burada  $R$ , çoklu korrelasyon katsayısını temsil ettiğinden, yukarıda açıklanan işlemler sonucunda, diğer istasyonlarla en küçük korrelasyona sahip istasyonun seçimi gerçekleşmiş olmaktadır.

- f) Yukarıdaki işlem sonuçları, adım adım ve son olarak tüm ölçüm ağı için değerlendirilirken, istasyonlar arasında aktarılmayan bilgi yüzdesi ( $t_j$ ):

$$t_j = H(X_1, \dots, X_{j-1}|X_j)/H(X_1, \dots, X_{j-1}) \quad (18)$$

aktarılan bilgi yüzdesi,  $(1 - t_j)$  de:

$$1 - t_j = \frac{T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j)}{H(X_1, \dots, X_{j-1})} \quad (19)$$

şeklinde belirlenebilir. Burada tasarımcı, mevcut istasyonları değerlendirirken, sistemde müsaade edilebilecek aktarılan (veya tekrarlanan) bilgi yüzdesi  $(1 - t_j)^*$  değerine karar verdiğinde, bu değeri veren istasyon kombinasyonunu, optimum sistem olarak seçebilir; bu noktadan sonra sisteme ilave edilecek tekrarlanan bilgiye neden olan istasyonlarda, incelenen değişkenin gözlenmesine son verme yoluna gidebilir.

- g) (f) adımımda açıklanan değerlendirmeler, her bir istasyon kombinasyonunun, incelenen değişken açısından havzadaki toplam belirsizliğindeki payı:

$$k_j = H(X_1, X_2, \dots, X_j)/H(X_1, X_2, \dots, X_M) \quad (20)$$

ile de gerçekleştirilebilir. Böylelikle öncelik sırasına göre dizilmiş istasyonlardan,  $j$  tanesi ile havza toplam belirsizliğinin öngörülen bir  $k_j^*$  yüzdesi ile giderildiği saptandığında, gerekli istasyon sayısına da karar verilebilir.

Bu yaklaşımla mevcut bir ölçüm ağının konuma göre değerlendirilmesi yapılmaktadır. Mevcutların dışında yeni istasyon konumu seçilmesi istendiğinde, yine entropi yöntemi kullanılarak azami bilgi getirecek şekilde yeni ölçüm noktalarının belirlenmesi de mümkün olmaktadır. Husain (1989) bu işlemi yağış gözlem ağları için, entropi tanımını iki mevcut istasyon arasındaki mesafenin fonksiyonu biçiminde ifade ederek gerçekleştirmiştir.

### Ölçüm sıklıklarının değerlendirilmesi

Entropi yöntemiyle ölçüm sıklığının değerlendirilmesi, gözlenen değişkenin marjinal entropisinde, süreçteki içsel bağımlılık nedeniyle oluşan azalmaların belirlenmesine dayanmaktadır. Eğer mevcutsa, böyle bir azalma, sürece ait ardışık gözlemlerde tekrarlanan bilgi miktarına eşit olmaktadır. Ölçüm sıklıklarının değerlendirilmesi, ağdaki her bir istasyonda ve izlenen her değişken için ayrı ayrı gerçekleştirilmelidir. Buradan elde edilen sonuçlara göre, ölçüm sıklıklarının aynen korunmasına veya azaltılmasına karar verilebilir. Bu amaçla yapılması önerilen işlemler aşağıda sırayla özetlenmiştir (Özkul, 1996; Harmancıoğlu ve Alpaslan, 1992):

- a) İlk olarak,  $j$  istasyonundaki  $X_j$  su kalitesi değişkenine uygun bir olasılık yoğunluk fonksiyonunun seçilmesi gerekir.  $X_j$  değişkeninin,  $k = 0, \dots, K$  öteleme adımları için,  $x_{j,i-k}$  değerleri ile temsil edilmesi ve böylelikle  $X_{j,k}$  alt dizilerine ayrılması halinde, problem çok değişkenli hale dönüşmektedir.
- b) Burada ilk çözümlenmesi gereken konu, incelenen değişkenin  $k$  içsel bağımlılık mertebesinde belirlenmesidir. Bu amaçla önce, değişkenin marjinal entropisi (13) bağıntısında  $M$  yerine 1 koyarak hesaplanabilir. (13) bağıntısı bu şekilde kullanıldığında, problem tek değişkenli hale dönüştüğünden,  $\mathbf{C}$  kovaryans matrisi doğrudan  $X_j$  değişkeninin  $\sigma^2$  varyansına dönüşmekte ve:

$$H(X_j) = \frac{1}{2} \ln 2\pi + \frac{1}{2} \ln \sigma^2 + \frac{1}{2} - \ln(\Delta x) \quad (21)$$

şeklini almaktadır.

- c) İkinci adımda, seçilen bir  $K$  maksimum öteleme adımına kadar  $k = 1, \dots, K$  zaman adımları için  $H(X_{j,0}|X_{j,1}, \dots, X_{j,k})$  koşullu entropileri,  $X_{j,0}, X_{j,1}, X_{j,2}, \dots, X_{j,k}$  alt dizileri

farklı değişkenlermiş gibi düşünülerek (13) bağıntısıyla hesaplanır.

$$\frac{H(X_{j,0}|X_{j,1}, \dots, X_{j,k})}{H(X_{j,0}, X_{j,1}, \dots, X_{j,k})} = H(X_{j,1}, \dots, X_{j,k}) \quad (22)$$

Burada koşullu entropiler, her bir  $k$  adımında marjinal entropinin hangi değere düştüğünü göstermektedir. Marjinal entropideki azalmanın kesildiği noktadaki  $k$  öteleme adımı, sürecin içsel bağımlılığının derecesini tanımlamakta ve bu  $k$  değerinden daha büyük öteleme adımlarının, belirsizliğin azalmasına belirgin bir katkısı bulunmamaktadır.

- d) Sürecin içsel bağımlılığının değerlendirilmesi sonucunda, ardışık  $k$  adımlarındaki gözlemler arasında yüksek bir bağımlılık bulunduğu takdirde bu özellik, ölçümler arasında tekrarlanan bilginin fazla olduğunu göstermektedir. Bu durumda ölçüm sıklığının azaltılması yoluna gidilebilir. Aksi halde, mevcut sıklıkla ölçümlere devam edilmesi gerekecektir.
- e) Aylık olarak gözlenen su kalitesi değişkenlerinde genelde birinci mertebeden bağımlılıklar ( $k=1$ ) önemli olmakta, marjinal entropideki en büyük azalma da bu adımda meydana gelmektedir (Harmancıoğlu ve Alpaslan, 1992). Bu durumda, ölçümlerin her ay yerine iki ayda bir yapıp yapılmayacağı, sıklığın bu şekilde azaltılmasıyla ne kadar bilgi kaybı olacağı araştırılabilir. Bunun için sürecin  $H(X_{i,0})$  marjinal entropisi ve  $H(X_{j,0}|X_{j,1})$  koşullu entropisi kullanılarak, sadece birinci derece bağımlılıklar dikkate alındığında ( $k = 1$ ) ardışık gözlemler arasındaki transinformasyon (tekrarlanan bilgi):

$$T(X_{j,0}, X_{j,1}) = H(X_{j,0}) - H(X_{j,0}|X_{j,1}) \quad (23)$$

şeklinde hesaplanır.  $T(X_{j,0}, X_{j,1})$ , ardışık gözlemler arasında aktarılan bilgiyi ifade etmektedir. Bu değer,  $X_{j,0}$  dizisinin toplam entropisine  $T(X_{j,0}, X_{j,1}) / H(X_{j,0})$  şeklinde oranlandığında, ölçüm sıklığının iki ayda bir indirilmesiyle elde edilecek bilgi yüzdesi belirlenebilir.  $1 - [T(X_{j,0}, X_{j,1}) / H(X_{j,0})]$  farkı da yine yüzde olarak, sıklığın azaltılmasıyla oluşacak bilgi kaybını (veya kalan belirsizliği) ifade edecektir. Burada, sıklığın iki ayda

bire düşürülmesiyle kaybedilecek bilgi miktarı ile bu durumda ölçüm masraflarında oluşacak azalma kıyaslanarak nihai sıklığa karar verilebilir.  $k = 2, 3, 4, \dots$  öteleme adımları (3, 4, 5, ... ayda bir ölçüm) için transinformasyonlar hesaplanarak, farklı ölçüm sıklıkları için benzer değerlendirmeler yapılabilir. Bu tür hesap, her bir ölçüm sıklığının ayrı ayrı ne kadar bilgi tekrarına neden olduğunu ortaya koymaktadır.

- f) Ölçüm sıklığının 2 ayda birin ötesinde 3, 4, 5, ve 6 ayda bir gibi daha geniş aralıklara da açılması, yine entropi yöntemiyle değerlendirilebilir. Bunun için (c) şıkında izlenen yaklaşım,  $k = 2$  (3 ayda bir),  $k = 3$  (4 ayda bir),  $k = 4$  (5 ayda bir) ve  $k = 5$  (6 ayda bir) öteleme adımları için de aynı şekilde uygulanabilir. Ancak bu kez toplam belirsizlik de artacağından, sıklığın azaltılmasıyla elde edilecek bilgi:

$$T(X_{j,0}, \dots, X_{j,k})/H(X_{j,0}, \dots, X_{j,k-1}) \quad (24)$$

şeklinde belirlenecektir. Bu oran büyük olduğunda, ölçüm sıklığını azaltmak; küçük olduğunda ise, mevcut ölçüm sıklığını muhafaza etmek suretiyle ölçümlerden azami bilgi edinmek söz konusu olabilecektir. Burada tasarımcı, söz konusu oranın hangi değerinde sıklığın azaltılabileceğine, istenen bilgi seviyesi ve buna karşı gelen masrafları değerlendirerek karar verebilir.

### Ölçüm ağlarının konum/ölçüm sıklığı özelliklerine göre birlikte değerlendirilmesi

Bazı yaklaşımlarda ölçüm ağı tasarımının, konum ve zaman boyutlarını birlikte içeren çözümlerle gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu tür yaklaşımlar, bir boyuttaki bilgi eksikliğinin, diğer boyutun yoğunlaştırılmasıyla giderilebileceği düşüncesinden kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle, istasyon sayısı artırılırken, sıklık azaltılarak veya istasyon sayısı azaltılarak sıklık artırılırken, istenen bilgiyi elde etmek mümkün olabilmektedir (Harmancıoğlu ve Alpaslan, 1992).

Konum ve sıklık boyutlarının birlikte analizi için, öncelikle istasyon konumlarının değerlendirilmesinde açıklanan esaslara uygun olarak, gözlem istasyonlarının en iyi kombinasyonu belirlenmelidir. Daha sonra, birinci öncelikli istasyondan başlamak üzere, öncelik listesindeki diğer istasyonlar kombinasyona

eklenerek istasyon sayısı birer birer arttırılır. Kombinasyona her istasyonun ilavesinde, farklı ölçüm sıklıklarında bu istasyonlar tarafından ne kadar bilgi sağlandığını belirlemek için ölçüm sıklıkları azaltılır. Son olarak, artan istasyon sayısı ve azalan ölçüm sıklıklarının her ikisine göre, bilgedeki değişimler aynı grafik üzerinde gösterilir. Bu analizlerde kullanılan özel bilgi ölçütü, konum ve sıklık boyutlarında tekrarlanan bilgiyi temsil eden transinformasyondur. Amaç, transinformasyonu minimum kılacak bir konum/sıklık kombinasyonunun seçilmesidir. Konum veya sıklık boyutlarının herhangi birinin arttırılması, maliyetlerin de artmasına yol açacaktır; başka bir deyişle, konum/sıklık boyutlarındaki azalma nedeniyle oluşan bilgi kaybı ile, bu azalmanın getirdiği maliyet düşüşü karşılaştırılabilir.

Konum ve zamana göre sıklığın birlikte ele alınması halinde problem, zaman ve konum boyutlarında çok değişkenli hale gelmektedir. Bu durumda,  $M \times (K+1)$  adet değişkenin ortak entropisinin ve farklı  $\Delta t$  ölçüm aralıklarına karşılık, çeşitli sayı ve konumdaki istasyon kombinasyonları için transinformasyonların (ortak bilgi) hesaplanması gerekmektedir. Burada,  $M$  toplam istasyon sayısını ve  $K$  da göz önüne alınan toplam öteleme adımı sayısını göstermektedir. Ortak ve koşullu entropiler yine (13) ve (14) no'lu bağıntılarla hesaplanmaktadır; ancak bu kez, ikinci bağıntıdaki  $C$  matrisi oto ve çapraz kovaryanslardan oluşmakta ve böylece, problemin zaman ve konum boyutlarındaki stokastik bağımlılığını yansıtmaktadır.

Konum/sıklık boyutlarının birlikte değerlendirilmesi problemi, ölçüm sıklığı ve istasyon sayılarının her ikisine göre, tekrarlanan bilgiyi gösteren transinformasyonların hesaplanmasını gerektirmektedir. Buna göre,  $j$  istasyon konumlarının belirlenmesi bölümünde anlatıldığı gibi istasyonun öncelik sırasını temsil etmek üzere,  $X_{j,0}$  ve  $X_{j+1,0}$  ile gösterilen iki istasyon için, transinformasyonlar  $T(X_{j,0}, X_{j+1,0})$  ( $k = 0$  veya mevcut gözlem sıklığı için),  $T(X_{j,1}, X_{j+1,1})$  ( $k = 1$  veya 1 zaman birimi arttırılmış ölçüm sıklığı için) ya da  $T(X_{j,k}, X_{j+1,k})$  (herhangi bir  $k$  öteleme adımı için) elde edilebilir.  $k = 0, \dots, K$  öteleme adımları ve  $j = 1, \dots, M$  olmak üzere toplam  $M$  sayıdaki istasyon için,  $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_M$ , transinformasyonlar  $T(X_{1,k}, X_{2,k}, \dots, X_{M,k})$  hesaplanmalıdır. Bu transinformasyonlar, ortak ve koşullu entropilerden yararlanılarak elde edilebilir. Bunun için, çok değişkenli hal için verilen ve  $M$  adet bağımlı değişkenin ortak entropisini veren (10) no'lu genel bağıntı kul-

lanılmalıdır. Bu bağıntıdaki her bir koşullu entropi:

$$T(X_1, X_2, \dots, X_M) = H(X_M) - H(X_M | X_1, X_2, \dots, X_{M-1}) \quad (25)$$

şeklinde transinformasyonları vermektedir. Buradaki bütün koşullu entropiler, (12) ve (13) no'lu bağıntılar yardımıyla hesaplanabilir. (10) ve (25) no'lu bağıntıların birleştirilmesiyle;

$$T(X_1, X_2, \dots, X_M) = H(X_1) + H(X_2) + \dots + H(X_M) - T(X_1, X_2) - T(X_1, X_2, X_3) - \dots - T(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{M-1}) - H(X_1, X_2, \dots, X_M) \quad (26)$$

bağıntısı elde edilir. Diğer taraftan, (26) bağıntısının çözümünde, denklemin sol tarafındaki tek bir transinformasyon değerini elde edebilmek için, sağ tarafındaki bir çok terimin hesaplanması gerekmektedir. Bu nedenle, aşağıdaki biçimde yazılabilen çok daha basit bir bağıntının kullanılması uygun olacaktır (Özkul, 1996):

$$T(X_1, X_2, \dots, X_M) = H(X_1) - H(X_1 | X_2, X_3, \dots, X_M) \quad (27)$$

Yine, öteleme adımları (27) no'lu bağıntıya ilave edilebilir ve transinformasyonlar:

$$T(X_{1,k}, X_{2,k}, \dots, X_{M,k}) = H(X_{1,k}) - H(X_{1,k} | X_{2,k}, \dots, X_{M,k}) \quad (28)$$

şeklinde hesaplanabilir. (28) bağıntısındaki bütün terimler, **C** matrisinin seçilen istasyonları ve belirlenen ölçüm sıklıklarını içerecek şekilde düzenlenmesi halinde (12) ve (13) no'lu bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir.

(28) no'lu bağıntı ile *M* sayıdaki istasyon ve *k* öteleme adımı için bütün transinformasyonlar hesaplandıktan sonra, değişen ölçüm sıklığı ve istasyon sayılarına bağlı olarak transinformasyonlardaki değişimi göstermek üzere nihai grafik oluşturulur.

Çeşitli ölçüm aralıklarında *M* istasyonun transinformasyonları için verilen (28) no'lu genel bağıntı, ölçüm sıklığını bütün istasyonlar için aynı olarak almaktadır. Gözlem ağı tasarımı daha uygun diğer bir yaklaşım, bir baz istasyon seçmek ve bu istasyonda ölçüm işlemini daha sık uygulamaktır. Bu takdirde, diğer istasyonlardaki ölçüm sıklığı azaltılarak, böyle bir azalmanın baz istasyona göre havzadaki bilgiyi nasıl etkilediği incelenebilir. Sunulan çalışmada bu yöntem uygulanmıştır. Burada yine en iyi istasyon kombinasyonu korunmaktadır ve ölçüm konumlarının belirlenmesi

bölümünde açıklandığı şekilde, istasyonlar, öncelik listesindeki sıraya uygun olarak gözlem ağına birer birer ilave edilmektedir. Bu seçim işlemine göre, incelenen değişken hakkında en büyük belirsizliği temsil ettiği için, birinci öncelikli istasyon baz istasyon olarak göz önüne alınır. *k=0* mevcut ölçüm sıklığını göstermek üzere, bu istasyon *X<sub>1,0</sub>* değişkeni olarak ele alınırsa, ölçüm sıklığı diğer istasyonlarda, *X<sub>2,k</sub>*, *X<sub>3,k</sub>*, ..., *X<sub>M,k</sub>* (*k = 0, ..., K*), değişecektir. Her bir farklı ölçüm sıklığı ve her bir istasyon kombinasyonu için transinformasyonlar:

$$T(X_{1,0}, X_{2,k}, X_{3,k}, \dots, X_{M,k}) = H(X_{1,0}) - H(X_{1,0} | X_{2,k}, X_{3,k}, \dots, X_{M,k}) \quad (29)$$

şeklinde hesaplanır (Harmancıoğlu ve Alpaslan, 1992). Esas olarak verilen bu ifade, farklı ölçüm sıklıkları uygulandığında, *X<sub>1,0</sub>* daki en büyük belirsizliğin azalmasına, farklı sayıdaki istasyonların nasıl katkıda bulunduğunu göstermektedir (Özkul, 1996).

## Uygulamalar

### Mevcut veri

Yukarıda açıklanan entropi yönteminin uygulaması, Gediz Havzası'nda gerçekleştirilmiştir. Havzada su kalitesi gözlem çalışmaları, 1980 yılında 6 istasyonla başlamıştır. Gediz Havzasındaki su kirliliği probleminin değerlendirilmesine yönelik bir proje kapsamında, 1990 yılında Çevre Bakanlığı ve DSİ Genel Müdürlüğü arasında bir protokol imzalanarak, 1991 yılından itibaren mevcut istasyon sayısı 33'e çıkarılmış ve 1993'de projenin tamamlanmasından sonra, su kalitesi gözlem istasyonu sayısı tekrar azaltılmıştır. Havzada halen, 14 istasyonda, 35 civarında su kalitesi değişkeninin aylık gözlemleri yapılmaktadır. Yöntem, DSİ'nin 1991-1993 yılları arasında işlettiği 33 istasyon (Şekil 1) dikkate alınarak, gözlem dizileri nispeten sürekli ve düzenli olan BOD, DO, SS, NH<sub>3</sub>-N, Cl<sup>-</sup>, Na, EC ve pH değişkenlerine uygulanmıştır (DSİ, 1985 ve 1987). Bu değişkenlerin bazı istasyonlardaki gözlem dizilerine ait örnek istatistikleri Tablo 1'de verilmektedir. Yapılan dağılım uygunluğu sınamalarında, istasyonların büyük bir kısmında söz konusu değişkenlerin lognormal dağılıma uygunluk gösterdiği belirlenmiştir (Harmancıoğlu vd., 1999). Diğer değişkenlerde ya ölçüm süreleri kısa olduğundan veya gözlem dizilerinde eksikli veri adedi fazla olduğundan entropi yöntemi ile anlamlı sonuç alınması mümkün olmamıştır.



**Tablo 1.** Gediz Havzasında incelenen kalite değişkenlerinin örnek istatistikleri (ortalama ve standart sapmaların birimleri, EC için  $\mu\text{mhos/cm}$ , diğer değişkenler için  $\text{mg/l't'}$ dir).

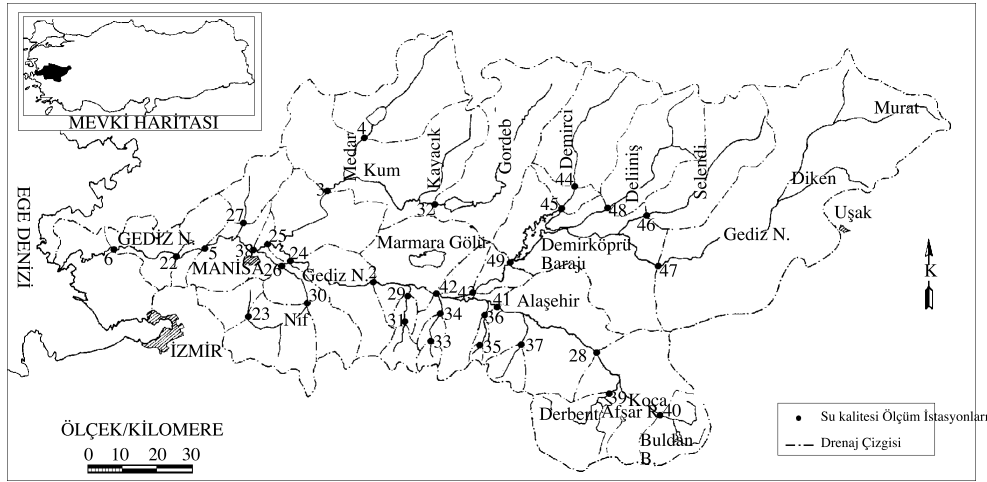
İst. No.	BOD				Cl <sup>-</sup>				DO				EC			
	Ort.	St. S.	c <sub>v</sub>	c <sub>s</sub>	Ort.	St. S.	c <sub>v</sub>	c <sub>s</sub>	Ort.	St. S.	c <sub>v</sub>	c <sub>s</sub>	Ort.	St. S.	c <sub>v</sub>	c <sub>s</sub>
2	4,552	2,866	0,630	2,368	48,455	20,508	0,423	1,409	8,649	1,899	0,220	0,537	770,48	260,09	0,338	0,740
5	12,965	14,683	1,133	2,126	68,732	48,476	0,705	3,315	5,784	2,570	0,444	0,002	907,40	366,93	0,404	1,314
6	6,448	6,448	1,000	2,395	61,865	26,860	0,434	0,761	7,343	2,355	0,321	0,480	852,25	302,54	0,355	0,838
22	10,613	7,244	0,683	0,836	72,130	30,068	0,417	0,648	6,497	1,868	0,288	0,457	947,02	277,54	0,293	0,374
23	1,840	1,461	0,794	1,712	48,628	32,310	0,664	4,032	9,336	1,951	0,209	-0,009	621,03	222,56	0,358	1,481
24	6,008	6,281	1,046	1,879	50,236	19,476	0,388	0,970	8,219	1,843	0,224	0,766	864,02	249,02	0,288	0,669
26	10,333	14,314	1,385	4,148	83,406	45,957	0,551	1,282	7,864	1,821	0,232	0,482	897,80	324,53	0,361	1,339
30	30,813	60,346	1,958	4,015	231,41	172,02	0,743	1,457	5,921	2,122	0,358	0,576	1823,6	1161,1	0,637	1,410
38	5,161	5,129	0,994	1,948	51,38	17,923	0,349	0,180	8,641	1,914	0,221	0,442	839,05	241,14	0,287	0,242
41	7,615	7,417	0,974	2,918	40,34	21,543	0,534	0,707	8,043	2,041	0,254	0,655	783,42	478,28	0,611	0,583
43	2,871	2,431	0,847	2,440	45,66	18,854	0,413	1,720	8,743	1,676	0,192	0,685	910,38	187,65	0,206	1,368
44	3,465	2,900	0,837	2,436	37,003	42,557	1,150	4,934	9,957	2,472	0,248	0,269	729,00	327,13	0,449	1,530
47	2,541	1,470	0,578	0,299	30,278	14,455	0,477	3,466	9,151	1,776	0,194	-0,089	908,30	224,98	0,248	0,809
49	2,581	1,402	0,543	0,978	30,783	13,197	0,429	3,465	8,498	1,336	0,157	0,036	714,05	133,02	0,186	1,121

İst. No	Na				NH <sub>3</sub> -N				pH				SS			
	Ort.	St. S.	c <sub>v</sub>	c <sub>s</sub>	Ort.	St. S.	c <sub>v</sub>	c <sub>s</sub>	Ort.	St. S.	c <sub>v</sub>	c <sub>s</sub>	Ort.	St. S.	c <sub>v</sub>	c <sub>s</sub>
2	46,111	28,941	0,628	0,423	0,108	0,235	2,168	3,352	7,945	0,433	0,055	-0,113	165,86	281,59	1,698	1,879
5	68,799	58,654	0,853	1,957	0,145	0,280	1,934	2,789	7,766	0,472	0,061	1,003	170,97	267,46	1,564	1,640
6	68,023	32,661	0,480	0,351	0,064	0,085	1,320	1,272	7,963	0,510	0,064	0,639	209,95	318,66	1,518	1,612
22	68,043	39,976	0,588	0,541	0,066	0,172	2,626	3,494	7,754	0,518	0,067	0,754	10,109	14,147	1,400	2,840
23	26,111	14,451	0,553	0,791	0,007	0,014	2,041	3,715	7,989	0,271	0,034	0,254	7,905	12,605	1,595	3,725
24					0,005	0,010	1,869	2,240	8,028	0,406	0,051	0,445	14,462	24,668	1,706	4,176
26	73,962	49,866	0,674	0,756	0,056	0,125	2,244	3,120	7,737	0,380	0,049	1,002	28,255	57,825	2,047	3,268
30	238,79	200,715	0,841	1,106	0,266	0,521	1,957	2,557	7,608	0,440	0,058	1,257	29,951	59,345	1,981	3,684
38	47,417	23,978	0,506	0,416	0,007	0,010	1,517	1,332	8,155	0,469	0,057	0,920	13,973	23,077	1,652	3,813
41	60,733	48,412	0,797	0,329	0,020	0,026	1,283	1,504	7,971	0,484	0,061	0,221	15,731	15,655	0,995	2,032
43	35,589	20,447	0,575	0,590	0,005	0,006	1,417	1,105	8,025	0,295	0,037	0,282	6,457	6,263	0,970	1,886
44	39,949	35,575	0,891	1,966	0,003	0,006	1,780	1,730	7,997	0,390	0,049	-0,250	12,133	24,934	2,055	4,550
47	31,548	13,822	0,438	0,218	0,008	0,012	1,445	1,783	8,006	0,380	0,047	0,319	18,154	48,339	2,663	5,055
49	29,329	15,649	0,534	1,366	0,002	0,005	1,976	1,903	7,978	0,380	0,048	-0,004	6,588	15,393	2,336	5,024

### Ölçüm konumlarının değerlendirilmesi

Belirtilen değişkenlerden BOD, DO ve  $Cl^-$  için istasyon konumlarının değerlendirilmesine yönelik nihai hesaplar, Tablo 2 ila Tablo 4'de verilmiştir. Tablolarda verilen bilgiler, Tablo 2'deki BOD örneğinde açıklanacak olursa, şu sonuçlara varılmaktadır. BOD hakkında bilgi tekrarı neden olmayacak istasyon kombinasyonu 15 konumdan oluşmaktadır. Bu 15 konum, değişkenin belirsizliği açısından öncelik sırasına dizilmiştir. BOD'nin en belirsiz olduğu konum, en büyük marjinal entropiye sahip olan havzanın mansabındaki 5 no.lu istasyon-

dur; dolayısıyla yapılan ölçümlerle BOD hakkında en fazla bilgi getiren konum da burasıdır. Öncelik sırasında ikinci konum 43 no.lu istasyon olup, Şekil 1'de gösterildiği gibi, Demirköprü Barajının mansabında Alaşehir birleşiminden önce yer almaktadır. 5 ile 43 no.lu istasyonlar arasındaki ortak bilgi minimumdur; başka bir deyişle, iki konumdaki BOD dizilerinin niteliği tamamen farklıdır. Üçüncü istasyon 29 no.lu konum olup, yaklaşık olarak havzanın tam ortasında yer almaktadır. Daha sonraki istasyonlar ise 5 ile 43 arasında, bir mabada bir mansapta olmak üzere dağılmaktadır.



Şekil 1. DSİ'nin Gediz Havzası'nda 1991-1993 yılları arasında işlettiği 33 istasyonun konumları.

Tablo 2. BOD örneğinde Gediz Havzası İstasyon Konumlarının İrdelenmesi

istasyon sırası	istasyon no	Ortak Entropi	Toplamda Pay $k_j$	Koşullu Entropi	Transinf.	Aktarılan Bilgi $(1 - t_j)$	Çoklu Korelasyon Katsayısı
(n)		(napier)	(%)	(napier)	(napier)	(%)	R (%)
1	5	4,5428	8				
2	43	8,9527	17	4,5428	0,0000	0,00	0,00
3	29	12,8865	24	8,9523	0,0004	0,00	2,83
4	42	16,3325	31	12,8833	0,0032	0,02	7,99
5	41	20,1685	38	16,3131	0,0194	0,12	19,51
6	30	24,1424	45	20,1356	0,0329	0,16	25,23
7	49	27,1981	51	24,0937	0,0487	0,20	30,46
8	22	30,5318	57	27,1289	0,0693	0,25	35,97
9	4	34,7926	65	30,4166	0,1153	0,38	45,38
10	26	38,1102	71	34,5255	0,2671	0,77	64,33
11	40	41,1817	77	37,7991	0,3111	0,82	68,06
12	23	44,2007	83	40,7504	0,4314	1,05	76,03
13	44	47,2018	88	43,6703	0,5304	1,20	80,86
14	6	50,7334	95	46,6158	0,5860	1,24	83,08
15	33	53,4713	100	49,9468	0,7866	1,55	89,03

**Tablo 3.** DO örneğinde Gediz Havzası İstasyon Konumlarının İrdelenmesi

istasyon sırası	istasyon no	Ortak Entropi	Toplamda Pay $k_j$	Koşullu Entropi	Transinf.	Aktarılan Bilgi ( $1 - t_j$ )	Çoklu Korelasyon Katsayısı R (%)
(n)		(napier)	(%)	(napier)	(napier)	(%)	R (%)
1	5	3,1819	12				
2	49	5,0936	19	3,1819	0,0000	0,00	0,00
3	24	7,2887	27	5,0932	0,0004	0,01	2,83
4	30	10,0206	37	7,2875	0,0012	0,02	4,89
5	42	12,3022	46	10,0153	0,0052	0,05	10,17
6	39	14,9188	56	12,2866	0,0156	0,13	17,52
7	25	17,0784	64	14,8674	0,0514	0,34	31,25
8	29	19,0462	71	16,9793	0,0991	0,58	42,40
9	22	21,5436	81	18,8692	0,1770	0,93	54,60
10	44	23,5825	88	21,1822	0,3614	1,68	71,73
11	2	25,3023	95	23,1100	0,4725	2,00	78,19
12	43	26,7270	100	24,6719	0,6303	2,49	84,65

Tablo 2'deki  $k_j$  değerlerine bakılacak olursa, ilk 7 sıradaki istasyonla, BOD'nin havzada 15 istasyonla temsil edilen toplam belirsizliğinin % 51'i giderilmektedir. 14 istasyonla ise bu yüzde % 95'e çıkmaktadır. ( $1-t_j$ ) değerleri, havzada 15 istasyonla BOD ölçümü yapıldığında, % 1,55 oranında bilgi tekrarı olduğunu göstermektedir. Bu da, söz konusu istasyonlar arasında % 89 korelasyona karşı gelmektedir. 15 istasyonun ötesinde diğer ölçüm konumlarının da devreye sokulmasıyla, bilgi tekrarının art-

ması beklenmelidir.

Tablo 3'den izlenebileceği gibi, DO için 12 istasyonla % 2,5 oranında bilgi tekrarı olmakta; bundan sonra sisteme ilave edilecek istasyonlar tekrarlanan bilgi üretmektedir. DO için de en belirsiz konum 5 no.lu istasyon olmakta; 2. sıradaki 49 no.lu istasyon (Demirköprü çıkışı) ise istatistiksel yönden zıt bir karakteri, yani değişkenliği daha az olan bir yapıyı temsil etmektedir.

**Tablo 4.**  $Cl^-$  örneğinde Gediz Havzası İstasyon Konumlarının İrdelenmesi

istasyon sırası	istasyon no	Ortak Entropi	Toplamda Pay $k_j$	Koşullu Entropi	Transinf.	Aktarılan Bilgi ( $1 - t_j$ )	Çoklu Korelasyon Katsayısı R (%)
(n)		(napier)	(%)	(napier)	(napier)	(%)	R (%)
1	30	3,5278	10				
2	27	6,2391	17	3,5277	0,0000	0,00	0,00
3	40	8,6327	24	6,2370	0,0021	0,03	6,47
4	32	11,2194	31	8,6170	0,0157	0,18	17,58
5	39	13,8400	39	11,1582	0,0612	0,55	33,94
6	49	16,2981	45	13,7496	0,0604	0,65	40,67
7	35	18,7707	52	16,1685	0,1296	0,80	47,78
8	23	21,5264	60	18,6321	0,1386	0,74	49,20
9	2	24,0734	67	21,2927	0,2337	1,09	61,10
10	45	26,7588	74	23,6767	0,3967	1,65	74,00
11	43	28,9771	81	26,3011	0,4578	1,71	77,44
12	6	31,3277	87	28,4159	0,5612	1,94	82,13
13	42	33,9468	94	30,5292	0,7984	2,55	89,30
14	34	35,1358	98	32,7442	1,2026	3,54	95,38
15	25	35,9263	100	33,5581	1,5777	4,49	97,84

$Cl^-$  açısından en belirsiz konum 30 no.lu istasyon olup, değişkenin havzadaki belirsizliğini tanımlamak üzere 15 istasyon gerekli olmakta; ancak bu istasyon adedi ile bilgi tekrarı yüzdesi % 4,5 mertebesine çıkmaktadır (Tablo 4).

SS açısından en belirsiz konum 3 no.lu istasyon (Kum Çayı - Killik) olmakta ve SS'in havzadaki belirsizliğini, bilgi tekrarına neden olmadan tanımlamak üzere 18 istasyon gerekli olmaktadır. BOD'de 15 istasyonla % 1,5 bilgi tekrarı söz konusu olurken, yaklaşık aynı yüzdeye burada 17-18 istasyonla ulaşılmaktadır.  $NH_3-N$  için en belirsiz konum Nif Çayı üzerindeki 30 no.lu istasyondur. Burada 13 istasyonla % 1,94 oranında bilgi tekrarı söz konusu olmaktadır. Na açısından en belirsiz konum Alaşehir kolu üzerinde olup, bu değişkeni havzada % 3,4 bilgi tekrarıyla tanımlamak için 17 istasyon gerekli olmaktadır. EC'de ise birinci öncelikli 32 no.lu istasyon Gördes Çayı üzerinde olup, toplam 12 istasyonla EC'nin havzadaki belirsizliği % 2 bilgi tekrarıyla giderilmektedir. Gediz için bulunan ilginç bir sonuç ise, pH için sadece 6 istasyonun yeterli bulunmasıdır. Hatta, tekrarlanan bilgi yüzdesi % 11'den % 7'ye düşürülmek isteniyorsa, 4-5 istasyon dahi yeterli olabilmektedir.

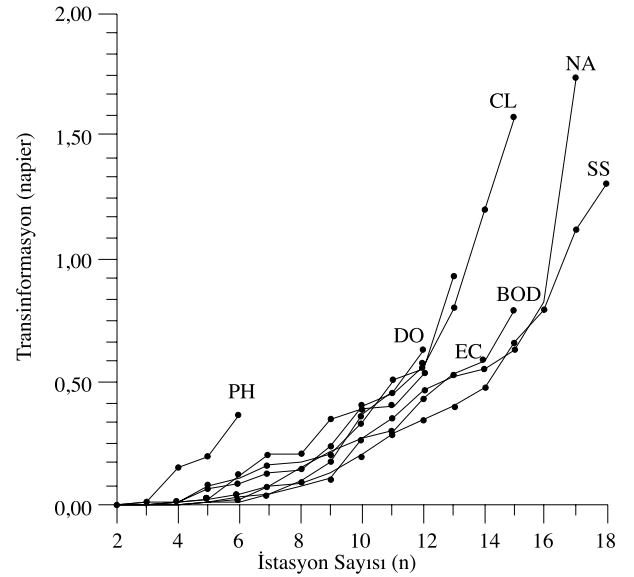
Tablo 2 ile Tablo 4'te verilen bilgiler ve diğer değişkenlere ait elde edilen sonuçlar, Şekil 2'deki transinformasyon eğrilerine dönüştürülmüştür. Bu şekilden de, her bir değişken için hangi istasyon adedinden sonra bilgi tekrarının hızla arttığı görülebilmektedir.

Entropi yönteminin Gediz Havzası'nda uygulanması sonucunda, farklı değişkenler için farklı sayıda istasyon adedinin gerekli olduğu; ayrıca, ölçüm konumlarının öncelik sıralarının da her bir değişken için farklı olduğu görülmüştür. Bu sonucun daha iyi değerlendirilebilmesi için, entropi yöntemi ile varılan istatistiksel bilgilerin havzadaki fiziksel durum ile doğrulanması, her bir değişkenin hangi nedenlerle farklı konumlarda daha belirsiz olduğunun incelenmesi gerekli görülmektedir.

### Ölçüm sıklıklarının değerlendirilmesi

Yöntem bölümünde açıklanan yaklaşım Gediz Havzası'nda, ölçümleri nispeten düzenli olan istasyonlarda gözlenmiş pH, SS, Na,  $NH_3-N$ , DO, EC, BOD ve  $Cl^-$  gözlem dizilerine uygulanmış ve bunlardan yine BOD, DO ve  $Cl^-$  değişkenlerine ait sonuçlar Şekil 3 ile 5'de sunulmuştur. Şekillerden izlenebileceği gibi, tüm değişkenlerde birinci mer-

tebeden içsel bağımlılık yüksek olup, daha sonraki zaman adımlarında sifıra yakın bağımlılıklar izlenmektedir. Buna göre, mevcut ölçüm aralığı 1 ay açıldığında tekrarlanan bilgi yüzdesi de sifıra yakın olmaktadır. Sadece, pH'da 6 no.lu istasyonda % 10 mertebesinde ve DO'da 49.no.lu istasyonda % 15 mertebesinde tekrarlanan bilgi (transinformasyon) bulunmaktadır. Bu sonuçlara göre, ölçüm sıklığının 2 ayda bir açılması halinde, ihmal edilebilir ölçüde bilgi kaybına neden olunacağını ve bu nedenle ölçümlerin 1 ay yerine 2 ayda bir yapılabileceğini söylemek mümkündür. Ancak bu sonucu temkinle karşılamak gerekir. Zira, Gediz'deki mevcut ölçümler sistematik ve düzenli bir şekilde ayda bir yapılmamaktadır. Ölçüm sıklığı düzensiz ve çoğu zaman 2 ayda bir olarak uygulanmaktadır. Dolayısıyla, şekillerde görülen ölçüm aralıklarının da (örneğin ayda bir ) gerçek durumu yansıtmadığını sorgulamak gerekir.

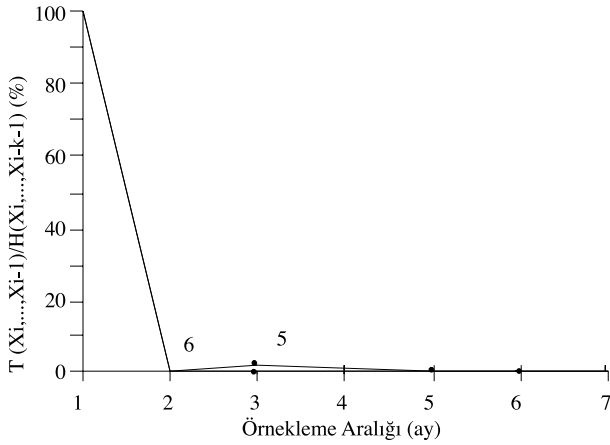


Şekil 2. Gediz Havzası'nda ölçülen değişkenlerin farklı istasyon adetleri için içerdikleri ortak bilgi miktarları (transinformasyonlar).

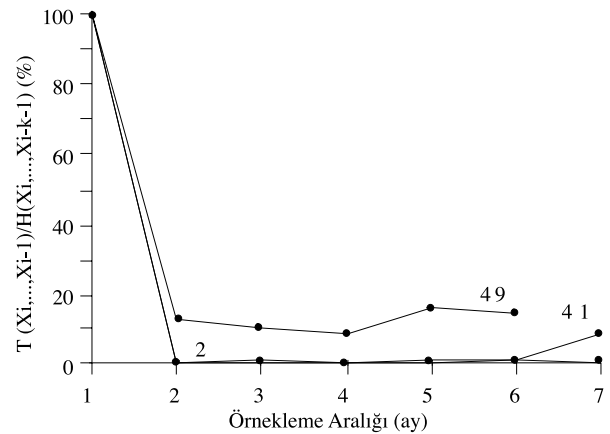
### Konum/ölçüm sıklığının birlikte değerlendirilmesi

Yöntem bölümünde açıklanan yaklaşım, Gediz Havzası'nda BOD,  $Cl^-$ , DO, pH, SS,  $NO_3-N$  ve Na değişkenlerine uygulanmıştır. Uygulamada önce 33 istasyon öncelik sırasına dizilerek en iyi istasyon kombinasyonu belirlenmiş; bu kombinasyonda birinci öncelikli istasyon (belirsizliği en büyük

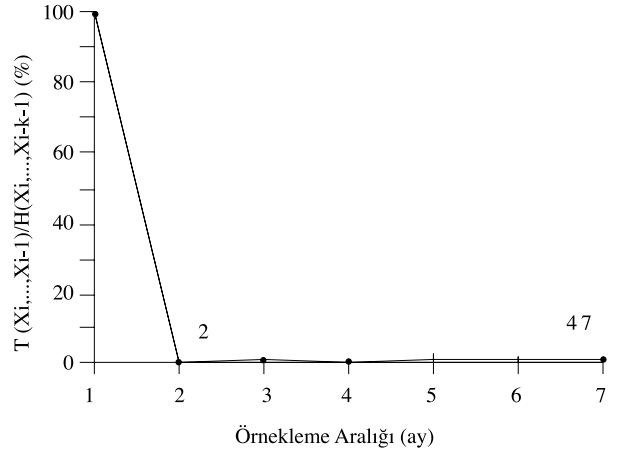
olan) aylık gözlemlerin korunacağı baz istasyon olarak seçilmiştir. Daha sonra istasyon adetleri birer birer arttırılarak, her bir kombinasyon için (29) bağıntısıyla  $T(X_{1,0}, X_{2,k}, X_{3,k}, \dots, X_{M,k})$  şeklindeki transinformasyonlar hesaplanmıştır. Bir sonraki adımda, baz istasyon haricindeki diğer istasyonlarda ölçüm sıklıkları değiştirilerek, bu değişikliğin havzadaki belirsizliğin giderilmesindeki etkileri araştırılmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen grafiklerden BOD, DO ve  $Cl^-$ 'a ait olanlar Şekil 6 ila 8'de verilmektedir. Bu şekiller son derece düzensiz ve yorum yapılmasına olanak sağlamayan eğriler vermektedir. Bu durumun da temel nedeni, Gediz'de ölçümlerin zaman boyutunda düzensiz (bazen ayda bir, bazen iki ayda bir gibi) yapılmasıdır.



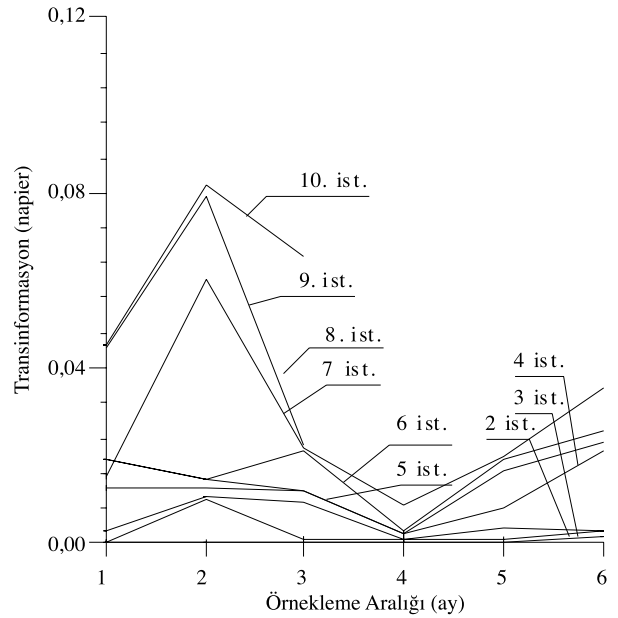
Şekil 3. BOD örneğinde ölçüm sıklıklarının irdelenmesi



Şekil 4. DO örneğinde ölçüm sıklıklarının irdelenmesi

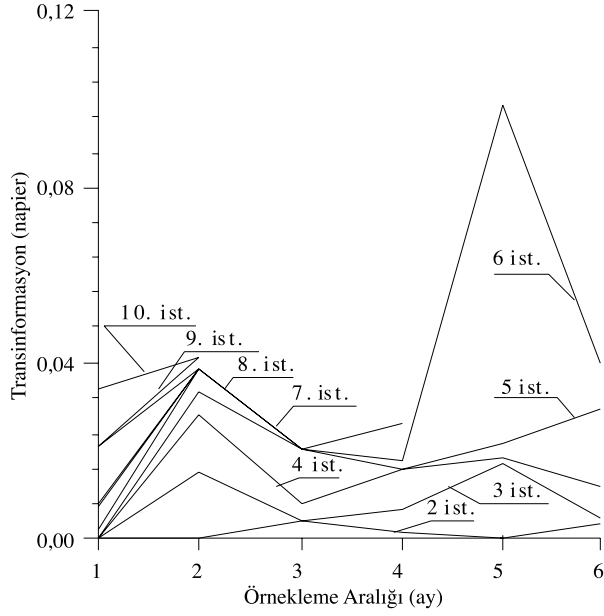


Şekil 5.  $Cl^-$  örneğinde ölçüm sıklıklarının irdelenmesi.

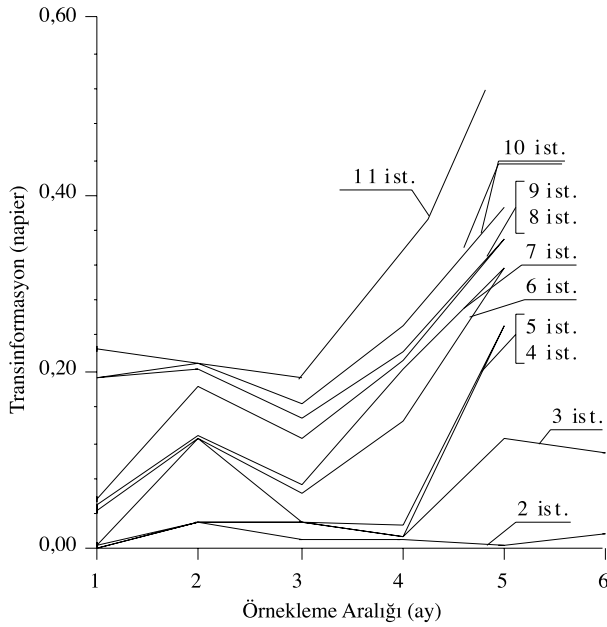


Şekil 6. Gediz BOD örneğinde farklı konum/sıklık seçenekleri için tekrarlanan bilgi miktarlarının değişimi.

Dolayısıyla Gediz Havzası uygulamasında, mevcut veriler, ölçüm ağının konum/sıklık açısından sağlıklı ve güvenilir biçimde istatistiksel analizine müsaade etmemiştir. Bu nedenle yöntemi geliştirilmek üzere, uzun süreli ve düzenli yapıdaki Mississippi Havzası su kalitesi verileri kullanılmıştır. Bu havzadan temin edilen veriler, Louisiana bölgesinde 12 adet istasyonu ve her istasyonda da aylık olarak düzenli ölçülmüş 27 yıllık kalite gözlemlerini içermektedir. Uygulama sonuçları, Şekil 9 ila 11'de, sırasıyla  $Cl^-$ , TSS, ve EC değişkenleri için sunulmuştur.



Şekil 7. Gediz DO örneğinde farklı konum/sıklık seçenekleri için tekrarlanan bilgi miktarlarının değişimi.



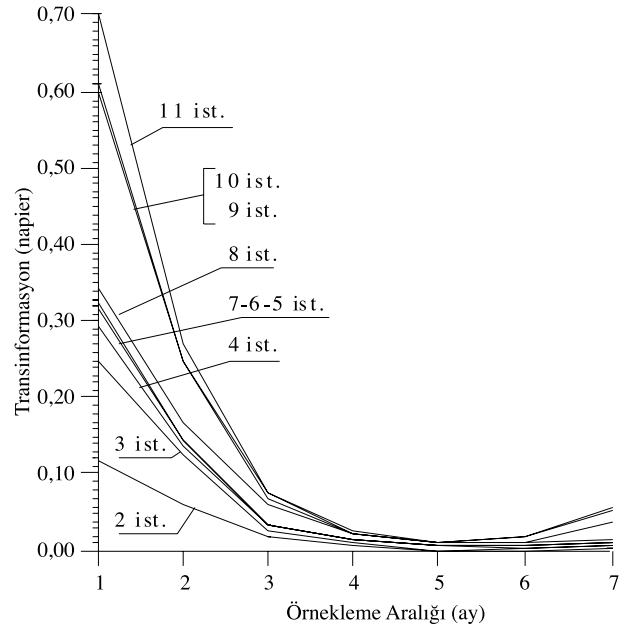
Şekil 8. Gediz Cl<sup>-</sup> örneğinde farklı konum/sıklık seçenekleri için tekrarlanan bilgi miktarlarının değişimi.

Bu şekiller üç kritere göre değerlendirilebilir:

- a) Sabit bir  $\Delta t$  ölçüm aralığı için, istasyon adedi arttıkça, sistemde tekrarlanan bilgi miktarı da artmaktadır;

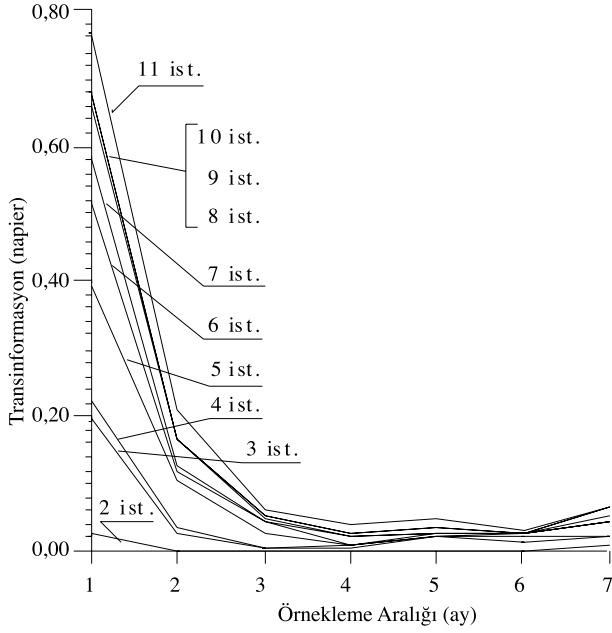
- b) Belli bir istasyon kombinasyonu için, ölçüm aralığı daraltıldıkça, sistemde tekrarlanan bilgi miktarı yine artmaktadır;

- c) Sabit bir transinformasyon (tekrarlanan bilgi) seviyesinde, çeşitli konum/sıklık alternatifleri bulunmaktadır. Burada tasarımcı, iki seçenek çözümü değerlendirebilir: (i) istasyon sayısını arttırmak, buna karşılık ölçüm sıklığını azaltmak; (ii) istasyon adedini azaltmak, buna karşılık ölçüm sıklığını arttırmak. Nihai kararın verilmesi için, konum veya zamana göre sıklığın azaltılmasıyla, masraflarda oluşacak azalmaların dikkate alınması gerekecektir.

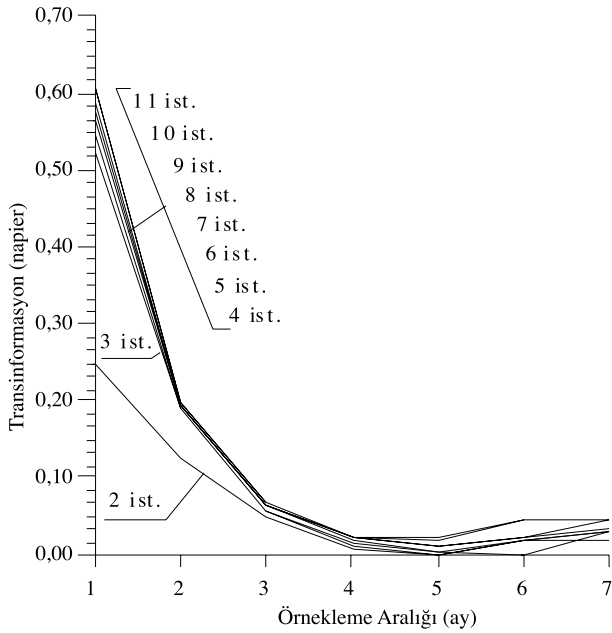


Şekil 9. Mississippi Cl<sup>-</sup> örneğinde farklı konum/sıklık seçenekleri için tekrarlanan bilgi miktarlarının değişimi.

Şekil 9 ile 11'e bakıldığında, Cl<sup>-</sup>, TSS, ve EC'nin düzgün transinformasyon eğrilerini verdikleri görülmektedir. Şekil 9'daki Cl<sup>-</sup> örneğinde, transinformasyonun 0,10 gibi sabit bir seviyede tutulması isteniyorsa, 2 istasyonlu bir kombinasyonda aylık gözlem yapılması uygun görülmektedir. İstasyon adedi 3 ile 7 arasında arttırıldığında, ölçüm sıklığı 2 ayda bir açılabilir. 8, 9, 10 ve 11 istasyon için ise, ölçüm sıklığı 3 ayda bir kadar genişletilebilir.



**Şekil 10.** Mississippi TSS örneğinde farklı konum/sıklık seçenekleri için tekrarlanan bilgi miktarlarının değişimi.



**Şekil 11.** Mississippi EC örneğinde farklı konum/sıklık seçenekleri için tekrarlanan bilgi miktarlarının değişimi.

## Sonuçlar

Entropi yönteminin Gediz ve Mississippi Havzaları su kalitesi verilerine uygulanması, gözlem

ağı değerlendirilmesine yönelik şu genel sonuçları ortaya çıkarmıştır:

**Konuma göre tasarım:** Bir gözlem ağındaki istasyonların en iyi kombinasyonu, kombinasyondaki istasyonlar arasındaki tekrarlanan bilginin minimize edilmesini öngören bir işlemle seçilebilir. Bu işlem, kombinasyona ilave edilen her yeni istasyonun herhangi bir bilgi tekrarına yol açmaksızın havza bazında belirsizliğin azalmasına katkıda bulunmasını sağlayacak şekilde, gözlem ağında muhafaza edilecek istasyonların bir öncelik listesinin oluşturulmasını sağlar.

**Ölçüm sıklığına göre tasarım:** Çalışmada kullanılan tüm su kalitesi dizileri, birinci meritede belirgin bir zamansal bağımlılık göstermiştir. Tekrarlanan bilgideki belirgin azalma, ölçüm sıklığındaki birimlik artışa karşılık gelen 1. zaman adımında meydana gelmiştir. Bu tür araştırmaların sonuçları göstermiştir ki, ölçüm konumlarının çoğunda hemen hemen tüm su kalitesi değişkenleri için mevcut aylık ölçüm periyodu iki ayda bir ölçüme çıkarılabilir. Bazı durumlarda ölçüm sıklığının daha azaltılması da mümkündür.

**Konum/ölçüm sıklığına göre tasarım:** Tekrarlanan bilginin her seviyesi için, farklı ölçüm konumu ve sıklığına göre çeşitli alternatifler mevcuttur. Bilgi gereksinimini karşılayacak mümkün olan en iyi tasarımın seçimi için, bu alternatiflerin maliyetlerinin de mukayesesi yapılmalıdır. Tasarımda, zaman/ölçüm konumunun birlikte değerlendirilmesi bir gözlem ağının temel yapısını da yansıtmaktadır; yani istasyon sayısı ve ölçüm sıklığının artmasıyla gözlem ağındaki aktarılan bilgi de artmaktadır. Burada geliştirilen yaklaşım, gözlem ağında korunmak istenen belirli bir tekrarlanan bilgi düzeyi için, en uygun istasyon sayısı ve ölçüm sıklığı kombinasyonunun seçimine olanak tanımaktadır.

Entropi yöntemi, aslında su kalitesinin zaman ve konuma bağlı değişkenliğinin incelenmesi esasına dayanan bir gözlem ağı değerlendirme yöntemidir. Yöntemin temel avantajı, bilginin ya da verilerin faydasının kantitatif olarak tanımlanmasına olanak sağlaması ve ayrıca, bir gözlem ağının çeşitli özelliklerinin (ölçüm konumları, sıklığı, ölçülecek değişkenler ve ölçüm süresi gibi) değerlendirilmesinde kullanılabilmesidir. Diğer taraftan, bir gözlem ağının çok değişkenli yapısını temsil edecek, uygun çok değişkenli olasılık yoğunluk fonksiyonunun seçimine son derece duyarlı olması, yöntemin en büyük sakıncasını teşkil etmektedir.

Şu anda, gözlem ağının değerlendirilmesi ve yeniden tasarımı için son karar verilmeden önce, gözlem ağı özelliklerinin farklı yaklaşımlarla araştırılması ve farklı tekniklerin birlikte kullanılması en sağlıklı çözüm olarak görülmektedir.

### Semboller

$ \mathbf{C} $	: $\mathbf{C}$ kovaryans matrisinin determinanı
$C_v$	: değişkenlik katsayısı
$f(x)$	: olasılık yoğunluk fonksiyonu
$H(X)$	: rastgele $X$ değişkeninin marjinal entropisi
$H(\mathbf{X})$	: $\mathbf{X}$ , $M$ adet değişkenden oluşan bir vektör olmak üzere, $\mathbf{X}$ 'in ortak entropisi
$H(X, Y)$	: rastgele $X$ ve $Y$ değişkenlerinin ortak entropisi
$H(X Y)$	: $Y$ 'nin bilinmesi halinde, $X$ 'in koşullu entropisi
$H(X_1, X_2, \dots, X_M)$	: $M$ adet değişkenin ortak entropisi
$H(X_M X_1, \dots, X_{M-1})$	: $X_1, \dots, X_{M-1}$ 'in bilinmesi halinde, $X_M$ değişkeninin koşullu entropisi
$H(X_1, \dots, X_{j-1} X_j)$	: öncelik sıralaması yapılmış istasyonlar için koşullu entropi
$i$	: $N$ örnek uzunluğu içerisindeki bir ölçüm anı
$j$	: istasyon öncelik indeksi

$k$	: öteleme adımı
$K$	: maksimum öteleme adımı sayısı
$k_j$	: $j$ adet istasyon ile açıklanan belirsizliğin $M$ adet istasyonla açıklanan toplam belirsizliğe oranı
$M$	: gözlem ağındaki toplam istasyon sayısı
$N$	: örnek uzunluğu
$p(x_i)$	: elemanter bir $X = x_i$ olayının olasılığı
$R$	: çoklu korrelasyon katsayısı
$t_j$	: aktarılamayan bilgi yüzdesi
$T(X, Y)$	: $X$ ve $Y$ gibi iki rastgele değişken arasındaki transinformasyon (ortak bilgi)
$T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j)$	: $j = 1, \dots, M$ olmak üzere, rastgele $X_j$ değişkeniyle gösterilen, öncelik sıralaması yapılmış istasyonlar arasındaki transinformasyon
$T(X_{1,k}, X_{2,k}, \dots, X_{M,k})$	: $k$ öteleme adımları için $M$ adet gözlem istasyonu arasındaki transinformasyon
$X_m$	: $m = 1, \dots, M$ olmak üzere, belirli bir ölçüm konumunda gözlenen bir su kalitesi değişkeni
$\Delta x, \Delta y$	: $X$ ve $Y$ değişkenleri için sınıf aralığı genişliği

### Kaynaklar

Adriaanse, M.J., Van de Kraats, J., Stoks, P.G., and Ward, R.C., "Conclusions Monitoring Tailor Made", Proceedings, Monitoring Tailor-Made, An International Workshop on Monitoring and Assessment in Water Management, Beekbergen, The Netherlands, Sept. 20-23, 345-347, 1995.

Amorcho, J., and Espildora, B., "Entropy in the Assessment of Uncertainty of Hydrologic Systems and Models", Water Resources Research, 9, 1511-1522, 1973.

Chapman, T.G. "Entropy as a Measure of Hydro-

logic Data Uncertainty and Model Performance", Journal of Hydrology, 85, 111-126, 1986.

Dixon, W., and Chiswell, B., "Review of Aquatic Monitoring Program Design", Water Research, 30(9), 1935-1948, 1996.

DSİ, Su Kalitesi Gözlem Yıllıkları (1979-1982), DSİ Genel Müdürlüğü, İçmesuyu ve Kanalizasyon Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1985.

DSİ, Su Kalitesi Gözlem Yıllıkları (1983-1984), DSİ Genel Müdürlüğü, İçmesuyu ve Kanalizasyon Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1987.



- Esterby, S.R., "Spatial Heterogeneity of Water Quality Parameters", *Statistical Aspects of Water Quality Monitoring*, (ed. A.H. Shaarawi and R.E. Kwiatkowski), Elsevier, 1-16, 1986.
- Harmancıoğlu, N., "Hidrolojik Süreçlerin Bilgi İçeriğinin Entropi Yöntemiyle Ölçülmesi", *Ege Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Dergisi, Atatürk'ün 100. Doğum Yılı Özel Sayısı*, 13-40, 1981.
- Harmancıoğlu, N.B., and Alpaslan, N., "Water Quality Monitoring Network Design: A Problem of Multi-objective Decision Making", *AWRA, Water Resources Bulletin, Special Issue on "Multiple Objective Decision Making in Water Resources"*, 28(1), 179-192, 1992.
- Harmancıoğlu, N.B. and Alpaslan, M.N., "Redesign of Water Quality Monitoring Networks", *Operational Water Management* (ed. J.C. Refsgaard and E.A. Karalis), A.A. Balkema, Rotterdam, 57-64, 1997.
- Harmancıoğlu, N.B., Özkul, S.D. and Alpaslan, M.N., "Water Quality Monitoring and Network Design", *Environmental Data Management* (ed. N.B. Harmancıoğlu, V.P. Singh and M.N. Alpaslan), Kluwer Academic Publishers, Water Science and Technology Library, 27(4), 61-106, 1998.
- Harmancıoğlu, N.B., Alpaslan, M.N., Özkul, S.D., İcaga, Y. Ve Fıstıkoğlu, O. "DSİ'nin Su Kalitesi İzleme Ağlarında Verimlilik Analizi ve Ölçüm Ağı İyileştirilmesi", *YDABÇAG-489 no.lu TÜBİTAK araştırma projesi raporu*, 1999.
- Husain, T., "Hydrologic Uncertainty Measure and Network Design", *AWRA, Water Resources Bulletin*, 25, 527-534, 1989.
- Jager, H.I., Sale, M.J. and Schmayr, R.L., "Cokriging to Assess Regional Stream Quality in the Southern Blue Ridge Province", *Water Resources Research*, 26(7), 1401-1412, 1990.
- Krstanovic, P.F. and Singh, V.P., "Evaluation of Rainfall Networks Using Entropy: I.Theoretical Development; II. Application", *Water Resources Management*, 6, 279-314, 1993.
- Moss, M.E., "Water Quality Data in the Information Age", *Proceedings, International Symposium on the Design of Water Quality Information Systems* (ed. R.C. Ward, J.C. Loftis, and G.B. McBride), Fort Collins, CSU Information Series, 61, 8-15, 1989.
- Moss, M.E., "On the Proper Selection of Surrogate Measures in the Design of Data Collection Networks", *Integrated Approach to Environmental Data Management Systems* (ed. N.B. Harmancıoğlu, M.N. Alpaslan, S.D. Özkul and V.P. Singh), Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series, 2. Environment, 31, 79-88, 1997.
- "National Water Quality Assessment Program: The Challenge of National Synthesis", *Committee on U.S. Geological Survey Water Resources Research, Water Science and Technology Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C*, 1994.
- Niederlander, H.A.G., Dogterom, J., Buijs, P.H.L., Hupkes, R., and Adriaanse, M., "UN/ECE Task Force on Monitoring and Assessment, Working Programme 1994/1995, Volume 5: State of the Art on Monitoring and Assessment of Rivers", *RIZA report: 95.068*, 1996.
- Özkul, S., "Space/Time Design of Water Quality Monitoring Networks by the Entropy Method" (İngilizce), *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Doktora Tezi (Yönetici: Nilgün B. Harmancıoğlu)*, 1996.
- Özkul, S.D., Harmancıoğlu, N.B., and Singh, V.P., "Entropy-based Assessment of Water Quality Monitoring Networks", *ASCE, Journal of Hydrologic Engineering*, 5(1), 90-100, 2000.
- Sanders, T.G., Ward, R.C., Loftis, J.C., Steele, T.D., Adrian, D.D., and Yevjevich, V., "Design of Networks for Monitoring Water Quality", *Water Resources Publications, Littleton, Colorado*, 1983.
- Schilperoort, T., and Groot, S., "Design and Optimization of Water Quality Monitoring Networks", *Paper presented at the International Symposium on Methods and Instrumentation for the Investigation of Groundwater Systems (MIIGS), Noordwijkerhout, the Netherlands, May 1982, publication no. 286*, 1983.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. "The Mathematical Theory of Communication", *Urbana, Illinois, The University of Illinois Press*, 1949.
- Smith, R.A., Schwarz, G.E. and Alexander, R.B., "Regional Interpretation of Water Quality Monitoring Data", *Water Resources Research*, 33(12), 2781-2798, 1997.
- Tirsch, F.S., and Male, J.W., "River Basin Water Quality Monitoring Network Design", *Options for Reaching Water Quality Goals, Proceedings of the Twentieth Annual Conference of American Water Resources Association* (ed. T.M. Schad), *AWRA Publications*, 149-156, 1984.
- Ward, R.C., "Water Quality Monitoring: Where's the Beef?", *AWRA, Water Resources Bulletin*, 32(4), 673-680, 1996.
- Ward, R.C. and Loftis, J.C., "Establishing Statistical Design Criteria for Water Quality Monitoring Systems: Review and Synthesis", *AWRA, Water Resources Bulletin*, 22(5), 759-767, 1986.

Ward, R.C., J.C. Loftis and G.B. McBride, "Design of Water Quality Monitoring Systems", Van Nostrand Reinhold, New York, 1994.

WMO, "Advances in Water Quality Monitoring - Report of a WMO Regional Workshop (Vienna, 7-11 March 1994)", World Meteorological Organiza-

tion", Technical Reports in Hydrology and Water Resources, 42, WMO/TD-NO 612, Geneva, Switzerland, 1994.

Yang, Y. and Burn, D.H., "An Entropy Approach to Data Collection Network Design", Journal of Hydrology, 157, 307-324, 1994.